doi:10.13866/j.azr.2019.01.28

新疆艾比湖绿洲干燥指数变化特征①

张桉赫[1,2,3]， 丁建丽[1,2,3]， 董 煜[4]， 张钧泳[1,2,3]， 谭 娇[1,2,3]

（1. 新疆大学智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046；
2. 新疆大学资源与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；
3. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046；
4. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054）

摘 要：基于艾比湖绿洲4个气象站1960—2013年逐月的气候资料，计算了干燥指数。结果表明：① 艾比湖绿洲近54 a干燥指数的均值为6.97，属于干旱地区，干燥指数呈显著下降趋势，并且持续性较强，下降幅度约为0.49·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$）；夏季的干燥指数最大，为9.04，冬季最小，仅为2.20。② 艾比湖绿洲全年干燥指数在1985年发生突变性减小，夏季和冬季发生突变性减小的年份为1991年和1983年，而春季和秋季不存在突变点。③ 艾比湖绿洲干燥指数的演变过程存在着7~8 a和20~21 a的周期变化，其变化的第一主周期为9 a，第二、三周期分别为21 a和5 a。④ 干燥指数对于风速的变化最为敏感，并且相对贡献率最高，而日照时数的变化最不敏感。

关键词：绿洲；干燥指数；气候变化；敏感系数；艾比湖；新疆

全球的气候变化已经是一个不争的事实，它会加速区域的水循环过程，并且改变全球水资源的分配[1-2]。而干旱被认为是最具破坏力的极端气候事件之一，给区域发展带来严重危害[3-4]。由于区域的干湿状况对于当地的经济社会发展和生态环境具有重要意义，近年来，关于区域干湿状况的研究受到了越来越多的关注。Nastos 等[5]预测，由于干燥指数的变化，欧洲南部将在21世纪末出现干旱状况；Tabari 等[6]发现，西亚半干旱地区的干燥指数要比湿润地区增加的更为明显；胡汝骥等[7]和施雅风等[8]指出，在全球气候变化的背景下，新疆和中国西北地区在20世纪80年代末发生了由暖干向暖湿的转变；同时 Liu 等[9]也发现，中国西北地区在1960—2010年的干燥指数显著下降。传统的气象学认为，降水的减少会造成区域的干旱化[10]，而新疆位于降水稀少、蒸发强烈的干旱—半干旱地区，如果仅考虑气温、降水等单一气象要素的变化，不足以从客观上描述新疆的干湿状况。区域的干湿状况是受多种因素控制的，而干燥指数就是一个非常有效的衡量区域水热状况的综合性指标，它可以被视为是区域气候的指示器[11]，对于区域自然区划、农业区划以及生态景观等的研究具有重要价值[12]。降水与潜在蒸发会直接影响区域的干旱程度[13]。普宗朝等[14]研究发现，新疆近48 a的降水量均呈增加趋势，潜在蒸散量总体呈减小趋势，而干燥指数表现为南疆大于北疆，各地的干燥指数也均有不同程度的减小；谭娇等[15]和热孜宛古丽等[16]指出，近几十年来艾比湖流域的潜在蒸散量呈显著的下降趋势；许兴斌等[17]发现，近50 a来艾比湖流域气候由暖干向暖湿转变。

迄今为止，中外学者对于不同区域尺度和时间尺度的气候变化及干燥指数进行了大量研究，但是关于艾比湖绿洲小尺度区域的气候变化多集中在基本气象要素和潜在蒸散发方面，干旱区的干燥指数研究也缺少对季节变化的关注。艾比湖绿洲是新疆北疆地区重要的农业区，是天山北坡经济带的重要区域，而水资源的稀缺是当地持续稳定发展的重要制约条件，同时艾比湖流域对气候变化的响应具有独特性[18]。因此，了解艾比湖绿洲的干湿状况对于区域农业生产和经济社会可持续发展至关重要，同时，对国家"一带一路"倡议的顺利实施具有重要意义。因此，本研究选择艾比湖绿洲为研究靶区，通过

① **收稿日期：**2018-07-01； **修订日期：**2018-08-13
基金项目：国家自然科学基金资助项目（41771470）；新疆自治区重点实验室专项基金资助项目（2016D03001）；自治区科技支疆项目（201591101）；教育部促进与美大地区科研合作与高层次人才培养项目资助
作者简介：张桉赫（1993-），男，硕士生，主要从事干旱区资源环境及遥感应用研究. E-mail：626394366@qq.com
通讯作者：丁建丽. E-mail：watarid@xju.edu.cn

近 54 a 的气象数据计算出该区域的干燥指数,以期在长时间序列上分析艾比湖绿洲干燥指数的变化趋势与特征。

1 研究区概况

艾比湖绿洲位于新疆的西北地区,属于欧亚大陆腹地的干旱区。研究区包括阿拉山口市、博乐市、温泉县和精河县,大致范围在 43°38′～45°52′N、79°53′～85°02′E。该区域属于典型的温带大陆性气候,降水稀少,蒸发强烈,蒸发量约为降水量的 7～35 倍[19],生态环境十分脆弱。研究区主要植被包括黑果枸杞、柽柳、芦苇和梭梭等。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究选用的 4 个气象站点分别为阿拉山口站、博乐站、温泉站和精河站,各气象站点的位置及资料如图 1 和表 1 所示。气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn),获取各站点 1960—2013 年逐月的平均气温、相对湿度、风速、日照时数等气象要素,根据面积加权法求出艾比湖绿洲各气象要素的均值。季节划分为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月至翌年 2 月)。

2.2 研究方法

2.2.1 潜在蒸散量的计算 本文采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散量 ET_0[20]。

2.2.2 干燥指数的计算 干燥指数的计算采用较为普遍的 ET_0 与降水量之比的方法[21],公式为:

$$I_a = \frac{ET_0}{P} \tag{1}$$

式中:I_a 为干燥指数;ET_0 为潜在蒸散量,mm·d^{-1};

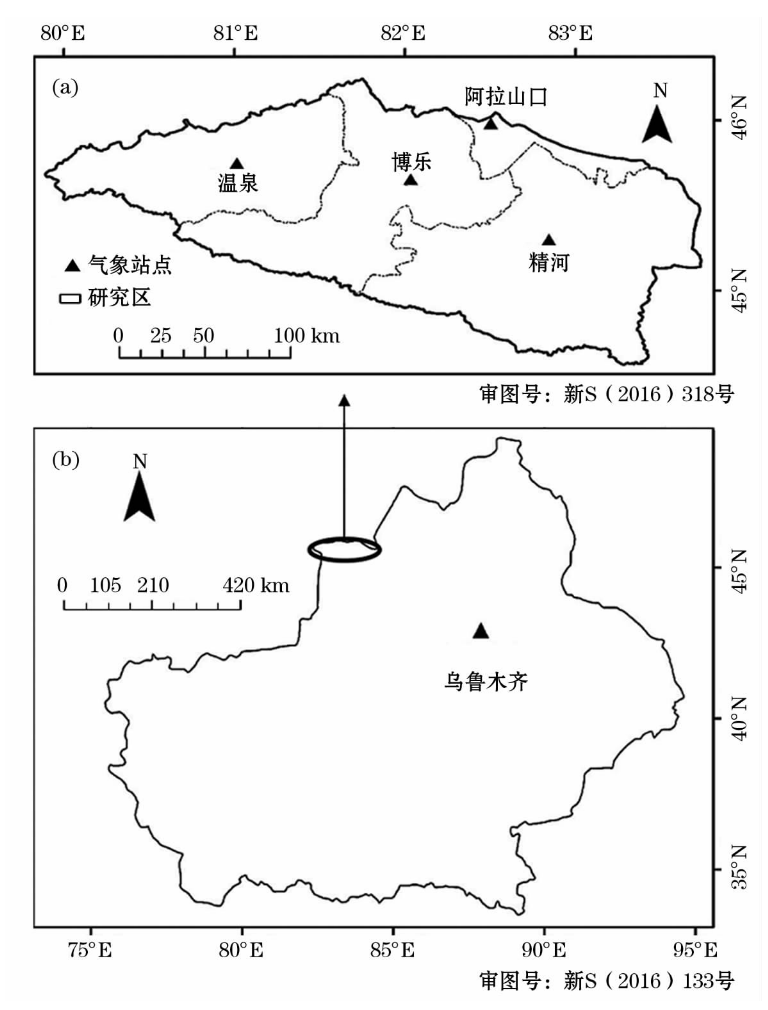


图 1 艾比湖绿洲位置及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Ebinur Lake Oasis

表 1　艾比湖绿洲气象站基本资料

Tab. 1　Basic information of the meteorological stations in the Ebinur Lake Oasis

气象站	编号	经度(E)	纬度(N)	海拔/m	权重
阿拉山口	51232	82°34′	45°11′	284.8	0.066
博乐	51238	82°04′	44°54′	531.9	0.283
温泉	51330	81°01′	44°58′	1 354.6	0.284
精河	51334	82°54′	44°37′	321.2	0.367

P 为降水量,mm。

2.2.3　突变分析及趋势检验方法　本研究采用 Mann-Kendall 突变检验方法,具体计算方法详见文献〔22〕。时间序列趋势成分的持续性检验采用 R/S 方法计算 Hurst 指数 H,计算方法详见文献〔23〕。

2.2.4　小波分析法　在气候诊断中,广泛使用的傅里叶变换可以显示出气候序列变化的尺度以及变化的时间位置。具体计算方法详见文献〔24〕。

2.2.5　气候敏感系数　干燥指数变化率与气候因子变化率之比被定义为干燥指数的气候敏感系数[25],计算方法详见文献〔26〕。

3　结果与分析

3.1　干燥指数年际及季节变化

通过公式(1)计算出艾比湖绿洲 1960—2013 年的干燥指数。由图 2 和表 2 可以看出,艾比湖绿洲 1960—2013 年的干燥指数呈显著下降趋势,下降幅度约为 0.49 · $(10a)^{-1}$ ($P<0.05$),多年平均值为 6.97。在中国,干燥指数小于 1 为湿润地区,1.0 ~ 1.5 为半湿润区,1.5 ~ 4.0 为半干旱区,大于 4 则为干旱区[26],因此研究区整体上属于干旱地区。全年干燥指数的 Hurst 指数 $H=0.77$,说明研究区全年干燥指数序列具有正的持续性,这表明艾比湖绿洲全年的干燥指数在过去呈减少趋势,意味着将来也呈减少趋势,并且该序列的正持续性较强。从 5 a 滑动平均值来看,艾比湖绿洲的干燥指数在均值附近呈波动下降趋势,波动幅度较小,1960—1983 年 5 a 滑动平均值多在近 54 a 均值的上方,其干燥指数均值为 7.90,而 1983 年之后多数 5 a 滑动平均值多在近 54 a 均值的下方,其均值为 6.23,说明 1960—1983 年艾比湖绿洲的干燥程度较 1983 年之后要更强。距平值表示气候变量偏离正常情况的程度。由表 2 可以看出,研究区年代际的干燥指数不断下降,全年的干燥指数在 1960s 和 1970s 为正距平,从 1980s 开始转为负距平,且负距平的绝对值不断增大,说明艾比湖绿洲全年干燥指数从 1980s 开始较多年平均值出现了下降趋势,并且这种趋势在不断增强。2000年后干燥指数的平均值较1960s

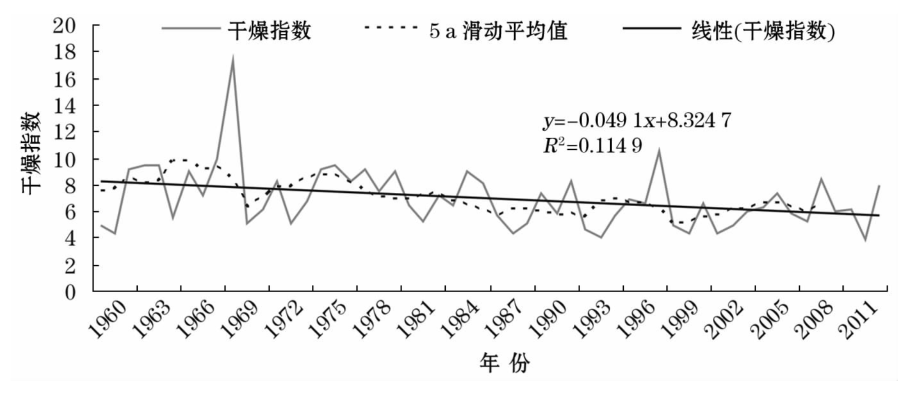


图 2　1960—2013 年研究区干燥指数变化趋势

Fig. 2　Change trend of aridity index in the study area during the period of 1960 – 2013

表 2　研究区干燥指数年际与季节变化

Tab. 2　The annual and seasonal variation of aridity index in the study area

时段	全年	距平	春季	距平	夏季	距平	秋季	距平	冬季	距平
1960s	8.65	1.68	7.48	0.51	10.46	3.49	11.33	4.36	3.69	-3.28
1970s	7.50	0.53	10.31	3.34	9.75	2.77	7.82	0.85	2.68	-4.30
1980s	6.67	-0.30	6.99	0.01	9.50	2.52	5.19	-1.78	1.95	-5.03
1990s	6.47	-0.50	8.93	1.95	8.59	1.62	7.33	0.35	1.40	-5.57
2000 年以后	5.96	-1.01	7.30	0.33	7.52	0.55	6.65	-0.32	1.52	-5.45
1960—2013 年	6.97	-	8.14	-	9.04	-	7.59	-	2.20	-

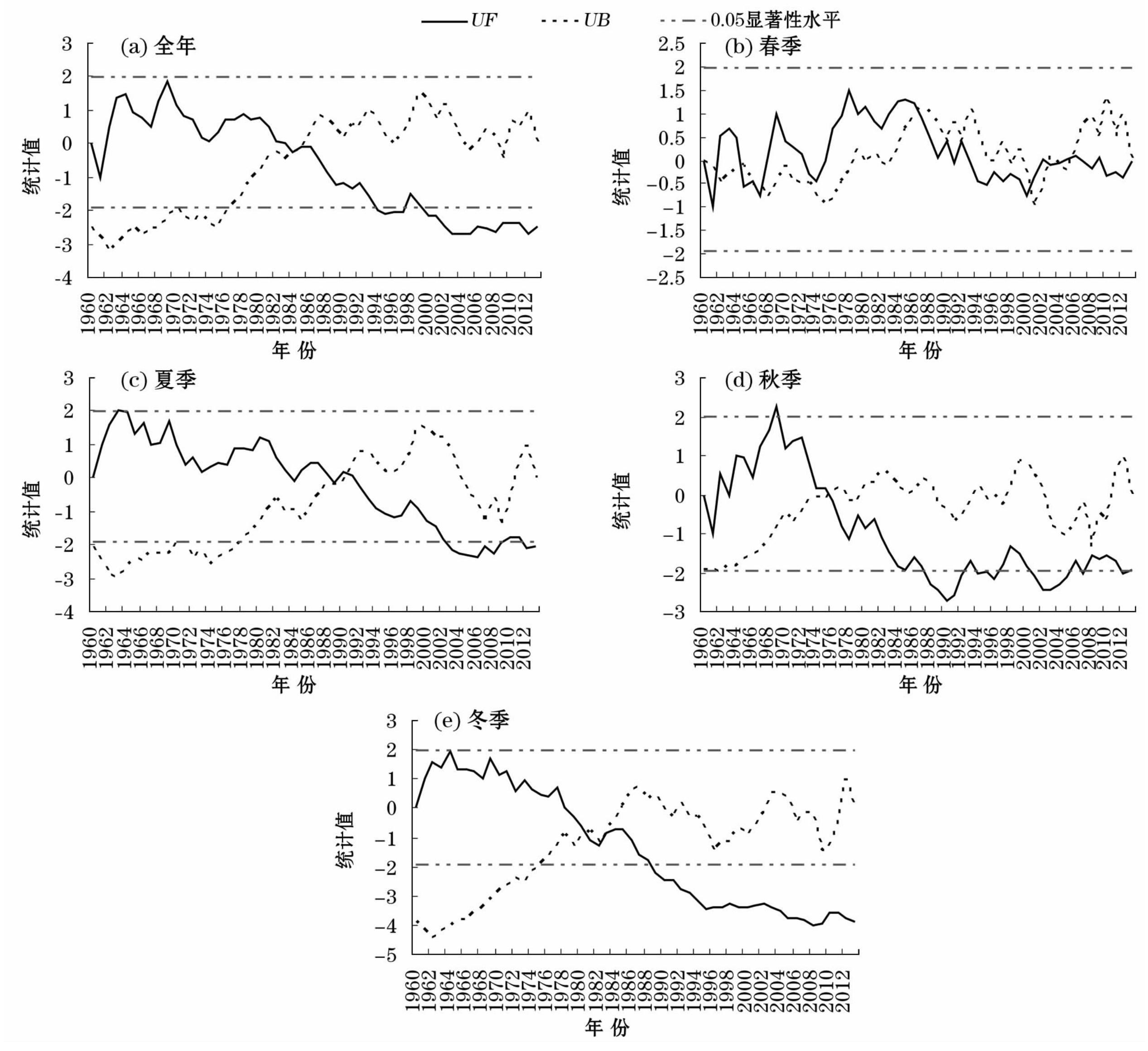


图 3 艾比湖绿洲年际与季节干燥指数 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 3 Mann-Kendall test of annual and seasonal aridity index in the Ebinur Lake Oasis

减小了 31.10%,其中 1960s—1970s 干燥指数的下降幅度最大,其值减小了 1.15,下降了13.29%,而 1980s—1990s 的变化最小,干燥指数仅减小了 0.2。

研究区夏季的干燥指数平均值最大,冬季最小,春、秋两季的差别不大。1960—2013 年 4 个季节的干燥指数均为波动减小趋势,与全年的变化趋势一致。其中春季的干燥指数波动较为明显,干燥指数的均值从 1960s 到 1970s、1980s 和 1990s 分别变化了 37.83%、6.55% 和 19.39%,而与 2000 年之后相比只变化了 2.41%;冬季的干燥指数变化幅度最大,2000 年之后的干燥指数均值比 1960s 下降了 58.81%;秋季干燥指数在 1960s—1970s 的变化也较为明显,下降了 30.98%;夏季干燥指数在 5 个时期的变化均较为平缓。研究区四季干燥指数的 Hurst 指数 H 分别为 0.54、0.73、0.60 和 0.91,四季的干燥指数序列均为正的持续性,但春季和秋季的正持续性较弱,而夏季和冬季的正持续性较强。春季和夏季干燥指数的距平均为正值,但距平值呈现出不断减小的趋势,干燥状况在不断改善。秋季干燥指数在 1980s 和 2000 年之后的距平值转为负值,在这两个时期秋季的干燥状况出现好转,而冬季的距平值均为负值,说明冬季的水分状况在整个时期均更好。

3.2 干燥指数突变检验及周期变化

图 3 为干燥指数 Mann-Kendall 突变检验的结果。从全年的突变检测结果来看,自 1980s 以来,干

燥指数有一个明显的减小趋势,尤其是在 2000 年之后,这种减小趋势均超过了显著性水平 0.05 临界线,说明研究区干燥指数的下降趋势是显著的。通过观察 *UF* 和 *UB* 曲线交点的位置,可以确定研究区干燥指数 1980s 的减小是一个突变现象,具体是从 1985 年开始的。对 1960—1985 年和 1986—2013 年这两个时间段的干燥指数进行 *t* 检验,结果表明 $|t_0| = 2.879 > t_{0.01}$ ($t_{0.01} = 2.674$),说明这两个时间段的干燥指数均值具有显著差异,1985 年为全年干燥指数的突变点。采用同样的方法对研究区四季的干燥指数进行突变检验,可以得出夏季和冬季的突变年份分别为 1991 年和 1983 年,而春季和秋季的干燥指数不存在突变点。

由图 4 可以看出,研究区干燥指数演变过程中存在着 7 ~ 8 a 和 20 ~ 21 a 的周期变化。其中,在 20 ~ 21 a 尺度上出现了小—大交替的准 4 次震荡,7 ~ 8 a 尺度上出现了准 8 次震荡,这两个尺度的周期变化在整个时间序列上表现的比较稳定,具有全域性。并且小波系数实部等值线在 1980s 之前较之后要更加密集,说明研究区的干燥指数在 1980s 之前的变化更为剧烈。

图 5 为小波方差的计算结果,干燥指数的小波方差图中存在 3 个明显的峰值,依次为 5 a、9 a 和 21 a 的时间尺度。其中,最大峰值对应着 9 a 的时间尺度,第 2 和第 3 峰值分别对应 21 a 和 5 a 的时间尺度,9 a 左右的周期震荡最强,是干燥指数变化的第一主周期,而 21 a 和 5 a 的时间尺度为干燥指数变化的第二、三周期。上述 3 个周期的波动控制着研究区干燥指数在整个时间域的变化特征。

3.3 干燥指数气候敏感系数及贡献率

从表 3 可以看出,这 6 个气候因子中,平均气温和降水量均呈极显著上升趋势,倾向率分别为 0.33 ℃·$(10a)^{-1}$ 和 12.177 mm·$(10a)^{-1}$ ($P < 0.01$);而风速和辐射量呈极显著下降趋势,倾向率分别为 -0.234 m·s^{-1}·$(10a)^{-1}$ 和 -317.5 MJ·m^{-2}·$(10a)^{-1}$ ($P < 0.01$);日照时数呈显著下降趋势($P < 0.05$),倾向率为 -408.5 h·$(10a)^{-1}$;只有相对湿度表现为不显著的下降趋势,倾向率为 -0.405%·$(10a)^{-1}$。6 个气候因子时间序列的 Hurst 指数均大于 0.5,其中平均气温、降水量和风速的正持续性较强,而相对湿度和日照时数的正持续性较弱。由各气候因子的敏感系数可知,干燥指数对于平均气温和降水量的响应呈减小趋势,而对相对湿度、风速、辐射量和日照时数的响应均为增加趋势。其中风速对于干燥指数的影响最大,敏感系数达到 2.10,其次为平均气温和相对湿度,敏感系数分别为 -1.49 和 1.21,而干燥指数对于日照时数最不敏感,敏感系数仅为 0.001 2,说明研究区的相

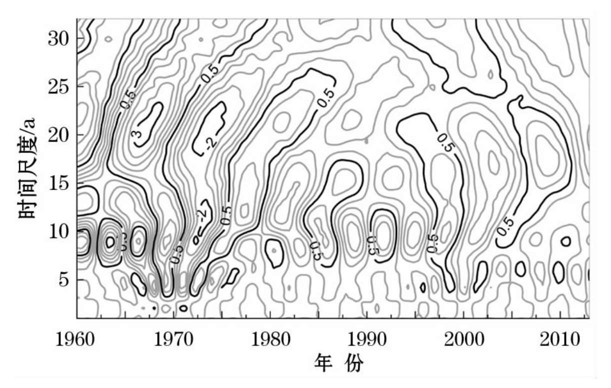


图 4 干燥指数小波实部等值线

Fig. 4 Isogram of the real part of wavelet coefficients of aridity index

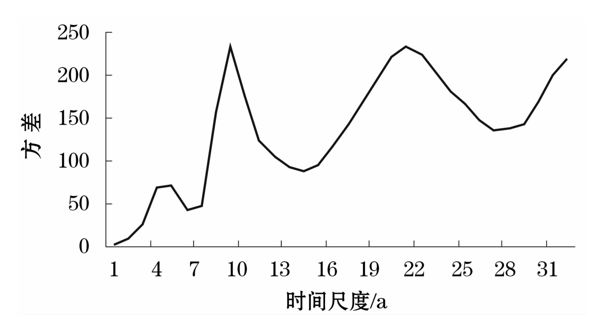


图 5 干燥指数小波方差

Fig. 5 The Morlet wavelet variance of aridity index

表 3 干燥指数的气候敏感系数

Tab. 3 The sensitivity coefficients about meteorological factors of aridity index

	平均气温	降水量	相对湿度	风速	辐射量	日照时数
倾向率	0.033**	1.211 7**	−0.040 5	−0.023 4**	−31.75**	−40.85*
Hurst 指数	0.77	0.77	0.57	0.79	0.69	0.59
气候敏感系数	−1.49	−0.04	1.21	2.10	0.001 5	0.001 2
相对贡献率/%	3.27	1.99	7.65	38.68	26.40	22.00

注:* 为通过 0.05 的显著性检验, * * 为通过 0.01 的显著性检验。

对湿度、风速、年辐射量和日照时数每增加10%,干燥指数就会相应增加12.1%、21.0%、0.015%和0.012%,而平均气温和年降水量每增加10%,则会使干燥指数下降14.9%和0.4%。从气候因子对于干燥指数的相对贡献率可以看出,风速对于干燥指数的贡献率最大,达到38.68%,辐射量和日照时数也均具有较高的贡献率,而降水量对于干燥指数的贡献最小,仅为1.99%。各气候因子中,风速的Hurst指数H、气候敏感系数和相对贡献率均大于其他气候因子,说明研究区干燥指数对于风速的持续性降低最为敏感,同时风速也对干燥指数有着最大的贡献率,因此研究区风速的下降趋势是造成该区域干燥指数降低的主要原因。

4 讨论

由干燥指数的计算公式可知,干燥指数与区域ET_0成正比,而与降水量成反比。王利平等[27]指出,中国西北地区干燥指数50 a来呈显著减小趋势,并且在1990s发生突变;董煜等[28]得出,新疆平均ET_0整体呈下降趋势,但在1995年发生突变性增加,对于艾比湖绿洲所处的天山北坡地区,风速与ET_0具有最高的完全相关系数和相对贡献率;谭娇等[15]也指出风速是艾比湖绿洲ET_0下降的主导因素。艾比湖绿洲位于阿拉山口大风主通道,常年大风对于当地的水分循环产生了极大影响,因此可能更为显著的影响了干燥指数的变化。关学锋等[29]指出,新疆北部地区春季、秋季和冬季增温显著,而夏季气温增幅不明显,这与研究区四季干燥指数所表现出的夏季波动小,其他3个季节波动大的变化趋势较为一致。郑红星等[26]对于东北地区干燥指数的气候敏感系数研究发现,干燥指数受降水的影响最大,而受风速的影响最小。因此,干燥指数的气候敏感系数受当地自然条件的影响显著,具有地域差异。而在进行干燥指数与各气候因子的敏感系数分析时,笔者假设各气候因子之间是相互独立的,然而实际上各因子之间是相互影响的。例如,太阳辐射的改变会影响地表的能量输入并进一步影响温度[30],因此干燥指数与气候因子的敏感系数还存在一定的不确定性。

新疆干燥指数的突变年份与ET_0突变年份相差10 a,这说明ET_0的突变并不能很快引起干燥指数的变化。李颖等[19]指出,艾比湖绿洲的降水量在过去54 a上升趋势不明显,但在1986年发生突变性增加,说明干燥指数对于降水量变化的响应时间更短。Roderick等[31]提出"蒸发悖论",即全球气温上升而潜在蒸散量减少的水文气象特征。通过已有结论可以看出艾比湖绿洲也存在"蒸发悖论",同时研究区的干燥指数也存在类似现象,即艾比湖绿洲的平均气温和降水量均为极显著上升趋势,前者有利于增加干燥指数,而后者有利于减少干燥指数,因此,研究区干燥指数的变化应是各项气候指标综合作用的结果。同时,人类活动和区域所处的地理位置都可能影响区域的气候变化[32-33]。近年来,相关学者对于土地利用变化与区域生态水文效应作了大量工作[34-37],指出土地利用变化很大程度上改变了辐射、云、地表反射率等,进而影响陆—气之间的能量、水分交换,水循环过程是水资源变化的重要影响因素。白泽龙等[38]认为,1970—2009年艾比湖流域耕地和建设用地面积增加幅度较大,随着人口增加和经济的发展,绿洲化趋势越来越明显。绿洲化的加剧使地表植被覆盖度增加,对风速起到抑制作用,同时绿洲的"冷岛效应"使局部区域温度降低,导致蒸散量减少,从而使干燥指数降低。

研究区季节的干燥指数只有冬季存在突变,其他3个季节均不存在突变现象,这可能是由于研究区冬季的气温均为零度以下,ET_0较其他季节小,并且较为稳定,显著增加的降水量可能是导致研究区冬季干燥指数发生突变的原因。普宗朝等[14]指出,新疆平均干燥指数在1987年发生了突变性减小,本研究结果与大尺度全新疆地区的突变年份相比只提前了2 a,并且具有较为一致的波动周期。干旱区的湖泊对于气候变化的响应非常敏感[39],胡汝骥等[40]首先报道了艾比湖湖面面积自1987年迅速扩大,艾比湖绿洲的干燥指数在1985年的突变性下降也与此事实相符。虽然研究区的干燥指数54 a来呈显著下降趋势,并且这种趋势还在持续,但研究区的干燥指数依然处于高值,艾比湖绿洲属于干旱地区这一事实依旧没有改变。

5 结论

(1)艾比湖绿洲1960—2013年的干燥指数呈显著下降趋势,下降幅度约为$0.49\cdot(10a)^{-1}$($P<0.05$),平均值为6.97,整体上属于干旱地区,并且这种减小的趋势性较强。4个季节的干燥指数均呈

波动减小趋势,春夏两季的干燥指数分别为 8.14 和 9.04,干燥程度较为严重,而冬季的均值仅为 2.20,夏季和冬季的减小持续性较强,而春秋两季持续性较弱。

(2)艾比湖绿洲全年干燥指数在 1985 年发生突变性减小,季节的干燥指数只有夏季和冬季存在突变性减小,突变年份分别为 1991 年和 1983 年,而春季和秋季的干燥指数不存在突变点。

(3)1960—2013 年艾比湖绿洲干燥指数的演变过程存在着 7 ~ 8 a 和 20 ~ 21 a 的周期变化,并且干燥指数在 1980s 之前的变化更为剧烈。干燥指数变化的第一主周期为 9 a,第二、三周期分别为 21 a 和 5 a。

(4)艾比湖绿洲平均气温和降水量呈显著上升趋势,而风速、辐射量和日照时数呈显著下降趋势,相对湿度表现为不显著下降趋势。干燥指数对于风速最为敏感,敏感系数达到 2.10,而对日照时数最不敏感,敏感系数仅为 0.001 2。风速对于干燥指数的相对贡献率最大,而降水量对于干燥指数的相对贡献率最小。

参考文献(References):

〔1〕 Stephens G L,Hu Y X. Are climate-related changes to the character of global-mean precipitation predictable?〔J〕. Environmental Research Letters,2010,5(2):2 960 – 2 967.

〔2〕 Francés G E,Quevauviller P,González E S M,et al. Climate change policy and water resources in the EU and Spain. A closer look into the Water Framework Directive〔J〕. Environmental Science & Policy,2017,69:1 – 12.

〔3〕 Cook B I,Ault T R,Smerdon J E. Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains〔J〕. Science Advances,2015,1(1):e1400082.

〔4〕 Li B,Su H,Chen F,et al. The changing characteristics of drought in China from 1982 to 2005〔J〕. Natural Hazards,2013,68(2):723 – 743.

〔5〕 Nastos P T,Politi N,Kapsomenakis J. Spatial and temporal variability of the Aridity Index in Greece〔J〕. Atmospheric Research,2013,119(1):140 – 152.

〔6〕 Tabari H,Aghajanloo M B. Temporal pattern of aridity index in Iran with considering precipitation and evapotranspiration trends〔J〕. International Journal of Climatology,2013,33(2):396 – 409.

〔7〕 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响〔J〕. 干旱区地理,2002,25(3):194 – 200.〔Hu Ruji,Jiang Fengqing,Wang Yajun,et al. A study on signals and effects of climatic pattern change from warm-dry to warm-wet in Xinjiang〔J〕. Arid Land Geography,2002,25(3):194 – 200.〕

〔8〕 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨〔J〕. 第四纪研究,2003,23(2):152 – 164.〔Shi Yafeng,Shen Yongping,Li Dongliang,et al. Disscussion on the present climate change from warm-dry to warm wet in northwest China〔J〕. Quaternary Sciences,2003,23(2):152 – 164.〕

〔9〕 Liu X,Zhang D,Luo Y,et al. Spatial and temporal changes in aridity index in Northwest China:1960 to 2010〔J〕. Theorectical & Applied Climatology,2013,112(1 – 2):307 – 316.

〔10〕 马柱国,符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析〔J〕. 气象学报,2001,59(6):737 – 746.〔Ma Zhuguo,Fu Congbin. Trend of surface humid index in the arid area of Northern China〔J〕. Acta Meteorologica Sinica,2001,59(6):737 – 746.〕

〔11〕 曹言,王杰,黄英,等. 基于干燥指数的近 45 年云南滇中地区干湿状况的变化特征〔J〕. 水土保持研究,2018,25(1):243 – 249.〔Cao Yan,Wang Jie,Huang Ying,et al. Variation characteristics of dry-wet conditions in central Yunnan in recent 45 years based on dry index〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2018,25(1):243 – 249.〕

〔12〕 王菱,谢贤群,李运生,等. 中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化〔J〕. 地理研究,2004,23(1):45 – 54.〔Wang Ling,Xie Xianqun,Li Yunsheng,et al. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in Northern China over the past 40 years〔J〕. Geographical Research,2004,23(1):45 – 54.〕

〔13〕 张红丽,张强,刘晓云. 华北河套地区气候干燥度的影响因素研究〔J〕. 气候变化研究进展,2016,12(1):20 – 27.〔Zhang Hongli,Zhang Qiang,Liu Xiaoyun. Study on the main factors of aridity in Hetao area of North China〔J〕. Climate Change Research,2016,12(1):20 – 27.〕

〔14〕 普宗朝,张山清,王胜兰,等. 近 48 a 新疆干湿气候时空变化特征〔J〕. 中国沙漠,2011,31(6):1 563 – 1 572.〔Pu Zongchao,Zhang Shanqing,Wang Shenglan,et al. The spatial-temporal variation characteristic of dry-wet climate in recent 48 years in Xinjiang province,China〔J〕. Journal of Desert Research,2011,31(6):1 563 – 1 572.〕

〔15〕 谭娇,丁建丽,董煜,等. 新疆艾比湖绿洲潜在蒸散量年代际变化特征〔J〕. 农业工程学报,2017,33(5):143 – 148.〔Tan Jiao,Ding Jianli,Dong Yu,et al. Decadal variation of potential evapotranspiration in Ebinur Lake oasis of Xinjiang〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(5):143 – 148.〕

〔16〕 热孜宛古丽·麦麦提依明,杨建军,刘巍. 艾比湖流域 1957—2013 年潜在蒸散、气温、降水变化特征分析〔J〕. 冰川冻土,2016,38(1):69 – 76.〔Reziwanguli Maimaitiyiming,Yang Jianjun,Liu Wei. Changing characteristics of potential evapotranspiration,air temperature and precipitation in Ebinur Lake basin from 1957 to 2013〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(1):69 – 76.〕

〔17〕 许兴斌,王勇辉,姚俊强. 艾比湖流域气候变化及对地表水资

源的影响[J]. 水土保持研究,2015,22(3):121 - 126. [Xu Xingbin, Wang Yonghun, Yao Junqiang. Impact of the climate change of Ebinur Lake Basin on surface water resources[J]. Research of Soil and Water Conservation,2015,22(3):121 - 126.]

[18] 秦鹏,刘强. 艾比湖流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 中国农村水利水电,2017(6):111 - 117. [Qin Peng, Liu Qiang. Spatio-temporal variation of evapotranspiration in Ebinur Lake Basin from 1961 to 2012[J]. China Rural Water and Hydropower,2017(6): 111 - 117.]

[19] 李颖,孜比布拉·司马义,董煜,等. 艾比湖绿洲地区降水变化规律及突变分析[J]. 节水灌溉,2017(10):41 - 45. [Li Ying, Zibibula Simayi, Dong Yu, et al. Analysis of variation rules and abrupt changes of precipitation in Aibi Lake Oasis[J]. Water Saving Irrigation,2017(10):41 - 45.]

[20] Allan R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper,1998,56.

[21] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等. 近 30 年中国陆地表层干湿状况研究[J]. 中国科学:地球科学,2005,35(3):276 - 283. [Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, et al. Study on dry-wet conditions of land surface in China in recent 30 years[J]. Science in China Ser. D Earth Sciences,2005,35(3):276 - 283.]

[22] 甄英,姜锐,何静. 青海玉树地区近 61 年气候变化特征分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2017,42(4):102 - 107. [Zhen Ying, Jiang Rui, He Jing. Analysis of climate change characteristics in Yushu area of Qinghai in recent 61 years[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition),2017,42(4):102 - 107.]

[23] 雷江群,刘登峰,黄强. 渭河流域气候变化及干湿状况时空分布分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(3):175 - 181. [Lei Jiangqun, Liu Dengfeng, Huang Qiang. Climate change and spatiotemporal distribution of dry-wet status in Wei River basin[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition),2015,45(3):175 - 181.]

[24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007. [Wei Fengying. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press,2007.]

[25] Yin Y, Wu S, Gang C, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. Theoretical & Applied Climatology,2010,101(1 - 2):19 - 28.

[26] 郑红星,刘静. 东北地区近 40 年干燥指数变化趋势及其气候敏感性[J]. 地理研究,2011,30(10):1 765 - 1 774. [Zheng Hongxing, Liu Jing. Long-term trends of aridity index and its sensitivity to climate factors in Northeast China:1971 - 2008[J]. Geographical Research,2011,30(10):1 765 - 1 774.]

[27] 王利平,文明,宋进喜,等. 1961—2014 年中国干燥度指数的时空变化研究[J]. 自然资源学报,2016,31(9):1 488 - 1 498. [Wang Liping, Wen Ming, Song Jinxi, et al. Spatial-temporal Variation of Aridity Index during 1961 - 2014 in China[J]. Journal of Natural Resources,2016,31(9):1 488 - 1 498.]

[28] 董煜,海米提·依米提. 1961—2013 年新疆潜在蒸散量变化特征及趋势[J]. 农业工程学报,2015,31(1):153 - 161. [Dong Yu, Haimiti Yimiti. Spatio-temporal variability and trend of potential evapotranspiration in Xinjiang from 1961 to 2013[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(1):153 - 161.]

[29] 关学锋,孙卫国,李敏姣,等. 1965—2012 年新疆北部地区气候变化及其对北极涛动的响应[J]. 干旱区研究,2016,33(4):681 - 689. [Guan Xuefeng, Sun Weiguo, Li Minjiao, et al. Climate change in North Xinjiang and its response to Arctic Oscillation during the period of 1965 - 2012[J]. Arid Zone Research,2016,33(4):681 - 689.]

[30] Li Y, Feng A, Liu W, et al. Variation of aridity index and the role of climate variables in the Southwest China[J]. Water,2017,9(10):743.

[31] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science,2002,298(5 597):1 410 - 1 411.

[32] Zheng C, Wang Q. Spatiotemporal pattern of the global sensitivity of the reference evapotranspiration to climatic variables in recent five decades over China[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment,2015,29(8):1 937 - 1 947.

[33] 谭娇,丁建丽,张钧泳,等. 1961—2014 年新疆北部地区气温时空变化特征[J]. 干旱区研究,2018,35(5):1 181 - 1 191. [Tan Jiao, Ding Jianli, Zhang Junyong, et al. Spatiotemporal variation of temperature in North Xinjiang during the period of 1961 - 2014[J]. Arid Zone Research,2018,35(5):1 181 - 1 191.]

[34] 金翠,张柏,宋开山,等. 土地利用/覆被变化对区域蒸散发影响的遥感分析——以吉林省乾安县为例[J]. 干旱区研究,2009,26(5):734 - 743. [Jin Cui, Zhang Bai, Song Kaishan, et al. RS-based analysis on the effects of land use/cover change on regional evapotranspiration:A case study in Qian'an County, Jilin Province[J]. Arid Zone Research,2009,26(5):734 - 743.]

[35] 董晴晴,占车生,王会肖,等. 2000 年以来的渭河流域实际蒸散发时空格局分析[J]. 干旱区地理,2016,39(2):327 - 335. [Dong Qingqing, Zhan Chesheng, Wang Huixiao, et al. Spatio-temporal patterns of actual evapotranspiration in the Weihe River Basin since 2000[J]. Arid Land Geography,2016,39(2):327 - 335.]

[36] 陈海山,李兴,华文剑. 近 20 年中国土地利用变化影响区域气候的数值模拟[J]. 大气科学,2015,39(2):357 - 369. [Chen Haishan, Li Xing, Hua Wenjian. Numerical simulation of the impact of land use/land cover change over China on regional climates during the last 20 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2015,39(2):357 - 369.]

[37] 姚俊强,杨青,毛炜峄,等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J]. 干旱区研究,2018,35(2):269 - 276. [Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Progress of study on variation of atmospheric water cycle factors over arid region in Northwest

China〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):269 –276.〕

〔38〕白泽龙,包安明,赵金,等. 艾比湖流域近 40 年来土地利用与覆被动态变化研究〔J〕. 水土保持通报,2012,32(2):172 –177.〔Bai Zelong, Bao Anming, Zhao Jin, et al. Land use/cover change of Ebinur Lake watershed in recent forty years〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation,2012,32(2):172 –177.〕

〔39〕柏春广,穆桂金. 艾比湖的湖岸地貌及其反映的湖面变化〔J〕. 干旱区地理,1999,22(1):34 –40.〔Bai Chunguang, Mu Guijin. Lake surface changes indicated by the shore landform of Aiby Lake, Western Jungar Basin, China〔J〕. Arid Land Geography, 1999,22(1):34 –40.〕

〔40〕胡汝骥,马虹,樊自立,等. 近期新疆湖泊变化所示的气候趋势〔J〕. 干旱区资源与环境,2002,16(1):20 –27.〔Hu Ruji, Ma Hong, Fan Zili, et al. The climate trend demonstrated by changes of the lakes in Xinjiang since resent years〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2002,16(1):20 –27.〕

Change of Aridity Index in the Ebinur Lake Oasis, Xinjiang

ZHANG An-he[1,2,3], DING Jian-li[1,2,3], DONG Yu[4], ZHANG Jun-yong[1,2,3], TAN Jiao[1,2,3]

(1. *Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Xinjiang University, Urumqi* 800046, *Xinjiang, China*;

2. *Collage of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *Xinjiang, China*;

3. *Key Laboratory of Oasis Ecology under Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *Xinjiang, China*;

4. *College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi* 830054, *Xinjiang, China*)

Abstract: In this paper, the values of annual and seasonal aridity index in the Ebinur Lake Oasis in Xinjiang, China were calculated based on the measured data of monthly precipitation, wind speed, relative humidity and radiation at four meteorological stations in the oasis during the period from1960 to 2013. The linear fitting method, Mann-Kendall mutation test, wavelet analysis and climate sensitivity coefficient test were used. The results are as follows: ① The average aridity index of the Ebinur Lake Oasis was 6.97 in recent 54 years, and it suggested that the study area could be categorized as an arid region. The aridity index was in a significant decrease trend with an average rate of 0.49 · $(10a)^{-1}$ ($P<0.05$). The average aridity index in summer was as high as 9.04, but its minimum value in winter was 2.20 only; ② The annual aridity index in the Ebinur Lake Oasis was sharply decreased in 1985. Seasonally, the sharp decrease of aridity index in summer and winter occurred in 1991 and 1983 respectively, however, there was no mutation of aridity index in spring and autumn; ③ There were 7 –8 –year and 20 –21 –year periodic variations of aridity index in the Ebinur Lake Oasis in recent 54 years, the first principal period of aridity index variation was for 9 years, and the second and third periodical changes were for 21 years and 5 years respectively; ④ The aridity index in the Ebinur Lake Oasis was the most sensitive to the change of wind speed, the contribution of wind speed change to the variation of aridity index was the highest, and the aridity index was not sensitive to the change of sunshine duration.

Key words: oasis; aridity index; climate change; sensitivity coefficient; Ebinur Lake; Xinjiang